

平成 21 年 4 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560602

研究課題名 (和文) 居住者の温冷感を考慮した空調負荷計算法の開発

研究課題名 (英文) A Study on Air-Conditioning Load Calculation Method Considering Thermal Sensation of the Resident

研究代表者

崔 軍 (CUI JUN)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号：90320340

研究成果の概要：現行の負荷計算法は、一定の空気温度が維持されたときに壁体などから室内空気への伝達熱量を負荷としているため、負荷と居住者の快適性との関係が設計段階では明確でない。本研究は、居住者の温冷感と負荷との関係を設計段階で定量的に把握できる、新しい空調負荷計算法を提案し、その有効性をシミュレーションにより明らかにした。また、居住者と放射パネルとの距離の違いによる暖房投入熱量の変化についても実験で検討した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	800,000	240,000	1,040,000
2008 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,200,000	360,000	1,560,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：負荷計算、快適性、PMV、空調、除去熱量

## 1. 研究開始当初の背景

応答係数法は、1967年に提案され、現在の非定常空調負荷計算の基礎となっている。応答係数法が発表されてから1980年代後半まで、負荷計算に関する研究が盛んに行われ数多くの計算方法が提案された。計算時間の短縮、コンピューター記憶容量の節約、外乱への近似および熱伝導方程式の非線形性への対応などの工夫によって、各種の計算方法は細部に違いがあるものの、空調負荷計算の段階では、室内空気温度のみが注目され居住者の温冷感が十分に考慮されていない点には変わらない。

## 2. 研究の目的

本研究は、室内空気温度のみでなく、居住者の温冷感に着目し、空調負荷計算の段階で居住者の温冷感に影響を及ぼす諸要素を計算条件として取り入れ、居住者の一定の温冷感を確保するための除去熱量を空調負荷とし、新しい空調負荷計算法の開発を目指すものである。

## 3. 研究の方法

本研究は、以下のような方法で進められた。

## (1) 計算モデルの構築

実用化を想定して居住者の温冷感と空調負荷との関係を定量的に把握できる計算モデルを構築する。

(2) シミュレーションによる検討

シミュレーション結果より、計算モデルの有効性を検証する。

(3) 実験による検討

放射パネルとの距離の違いによる快適性および空調投入熱量の変化を実験で調べ、計算モデルの有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 計算モデル

① 壁体の熱収支

壁体内部の非定常熱移動は、空間的に一次元と考え、逐次状態遷移法で計算される。 $n$ 時刻における壁体内表面 $m$ での熱収支は式(1)で表される。

$$S_m \Delta q_m^n + \sum_{j=1}^8 \alpha_{r,j \rightarrow m}^n S_j (t_j^n - t_m^n) + \alpha_{c,m}^n S_m (t_i^n - t_m^n) + R_m^n = 0 \quad (1)$$

ただし、

- $S$ : 壁体内表面の面積、 $m^2$      $t$ : 温度、 $^{\circ}C$
- $R$ : 内表面に吸収された放射熱 (ただし、内表面間相互放射は別途計算)、 $W$
- $\alpha_c$ : 対流熱伝達率、 $W/(m^2 \cdot K)$
- $\alpha_r$ : 放射熱伝達率、 $W/(m^2 \cdot K)$
- 添字 (下付き)
- $i$ : 室内空気、 $j, m$ : 内表面番号
- 添字 (上付き)
- $n$ : 時刻

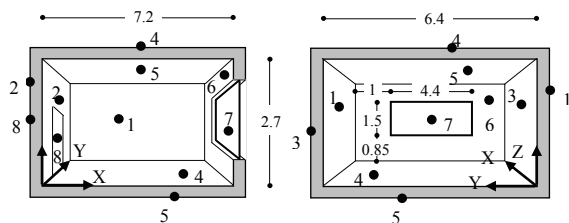
$\Delta q$ : 相当外気温度または内表面温度変化による表面熱流、 $W/m^2$

$$\Delta q_m^n = Tq_m^n - Aq_m^n \quad (2)$$

$Tq$ : 外壁の相当外気温度変化、または内壁の反対側の表面温度変化による貫流熱応答、 $W/m^2$

$Aq$ : 内表面温度変化による吸熱応答、 $W/m^2$   
表面 $m$ での貫流熱応答は、梯形波によるパルス伝達関数を利用して、以下の逐次状態遷移式で与えられる。

$$Tq_m^n = A_{m,0} t_m^n + \sum_{k=1}^{K_0} w_{m,k}^n \quad (3)$$



a) 南北断面

b) 東西断面

図1 建物寸法 (単位:  $m$ ) と壁面番号

ただし、

$$w_{m,k}^n = e^{-\beta_{m,k} \Delta T} w_{m,k}^{n-1} + \frac{A_{m,T,k} (1 - e^{-\beta_{m,k} \Delta T})}{\beta_{m,k} \Delta T} (t_{m,e}^n - t_{m,e}^{n-1})$$

$$w_{m,k}^0 = A_{m,T,k} t_{m,e}^0$$

$\Delta T$ : 計算時間間隔、 $s$

$K_0$ : 多層壁体の固有方程式の根の数

$\beta$ : 多層壁体の固有方程式の根

$A_{m,0}$ : 多層壁体 $m$ の熱貫流率、 $W/(m^2 \cdot K)$

$A_{m,T,k}$ : 外壁の相当外気温度のステップ変化、または内壁の反対側表面温度のステップ変化に対する多層壁体 $m$ の貫流ステップ応答関数の係数

添字 (下付き)

$e$ : 外壁の相当外気温度又は内壁の反対側温度  
同様に、内表面温度変化による吸熱応答について式(4)が得られる。

$$Aq_m^n = A_{m,0} t_m^n + \sum_{k=1}^{K_0} w_{m,k}^n \quad (4)$$

ただし、

$$w_{m,k}^n = e^{-\beta_{m,k} \Delta T} w_{m,k}^{n-1} + \frac{A_{m,A,k} (1 - e^{-\beta_{m,k} \Delta T})}{\beta_{m,k} \Delta T} (t_m^n - t_m^{n-1})$$

$$w_{m,k}^0 = A_{m,A,k} t_m^0$$

$A_{m,A,k}$ : 内表面温度ステップ変化に対する多層壁体 $m$ の吸熱ステップ応答関数の係数  
式(2)~式(4)を式(1)に代入すると、内表面 $m$ について式(1)左辺第1項が求められる。

② 内表面間の長波長放射熱伝達

内表面 $m$ における長波長放射熱収支は式(5)で表せる。

$$q_m^n = \varepsilon_m \sigma \sum_{j=1}^8 B_{mj} (T_j^4 - T_m^4) S_m \quad (5)$$

ただし、

$\varepsilon$ : 長波長放射率、 $T$ : 温度、 $K$

$\sigma$ : ステファン・ボルツマン定数、

$$5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$$

$B_{mj}$ : 面 $m$ から射出された放射エネルギーの内、面 $j$ で吸収された放射エネルギーの割合として定義される Gebhart 吸収係数

$$B_{mj} = \varepsilon_j F_{mj} + \sum_{l=1}^8 (1 - \varepsilon_l) F_{ml} B_{lj} \quad (6)$$

ただし、

$F_{ml}$ : 面 $m$ から見た面 $l$ の形態係数

内表面間の温度差が大きい場合、式(5)は式(7)で近似できる。

$$q_m^n = \sum_{j=1}^8 \alpha_{r,j \rightarrow m}^n S_m (t_j^n - t_m^n) \quad (7)$$

ただし、

$$\alpha_{r,j \rightarrow m}^n = C_b \varepsilon_j B_{jm}^n H_{jm}^n$$

$C_b$ : 黒体の放射定数、 $5.67 W/(m^2 \cdot K^4)$

$$H_{jm}^n \approx 0.04[(T_j^n + T_m^n)/200]^3$$

ただし、今回は計算時間間隔を 10 分とし、

$$H_{jm}^n \approx 0.04[(T_j^{n-1} + T_m^{n-1})/200]^3$$

とした。式(7)を用いると、式(1)左辺第 2 項(室内表面間の長波長放射熱伝達)が求められる。

③窓ガラスの透過率・反射率・吸収率の計算  
ガラスの直達日射の透過率・反射率・吸収率は、メーカーの技術資料を参考に入射角の関数として算出する。天空日射の透過率・反射率・吸収率は入射角 60°の値を使う。

④窓ガラスを透過する日射量の計算

内表面に吸収される天空日射の割合は、窓面の位置によって決まり時刻と関係ないため、一回計算しておけばよい。本研究では、天空日射が窓面を透過して室内へ侵入し最終的に各内表面に吸収されるプロセスを多数のエネルギー粒子が室内へ侵入し各内表面で多重反射・吸収されるものと看做し、その多重反射・吸収のプロセスを Monte Carlo 法で計算する。

図 1 に示す窓面から射出するエネルギー粒子の出発位置は一様乱数で決める。その射出方向 ( $\eta$ ,  $\theta$ ) は式(8)と式(9)で求められる。

$$2\eta - \sin(2\eta) - 2\pi R_\eta = 0 \quad (0 < \eta < \pi) \quad (8)$$

$$\theta = \pi R_\theta + \pi/2 \quad (\pi/2 < \theta < 3\pi/2) \quad (9)$$

ただし、

$R_\eta$ ,  $R_\theta$ : 0~1 の間の一様乱数

$\eta$ : エネルギー粒子の射出方向と Z 軸との角度、rad

$\theta$ : エネルギー粒子の射出方向と X 軸との角度、rad

ある壁面に到達したエネルギー粒子の吸収・反射は一様乱数で決まる。粒子が反射されるときはの射出方向を表 1 に示す。

窓ガラスを透過し室内へ侵入する直達日射は、時刻によって方向が変わるので、太陽方位角、太陽高度および窓面の方位角より、窓面から室内への射出方向を時刻ごとに決める必要がある。その射出方向が決まれば後の計算は天空日射の場合と同様である。

上記のように、窓ガラスを透過した天空日射と直達日射の各内表面での吸収割合が求まれば、ガラスの日射透過率を利用して各内表面で吸収される日射量が計算でき、式(1)左辺の第 4 項の日射成分が求められる。

⑤室内空気の熱収支

室内空気温度は一様分布とし、室内空気について以下の収支式を用いる。

$$Vc\rho(dt_i/d\tau) = \sum_{j=1}^8 S_j \alpha_{c,j}(t_j - t_i) + Q_R + Q_L - HCL \quad (10)$$

ただし、

$c$ : 空気の比熱、 $J/(kg \cdot K)$

$\rho$ : 空気の密度、 $kg/m^3$   $V$ : 部屋の容積、 $m^3$

$Q_R$ : 室内顕熱発熱量、 $W$

$Q_L$ : 隙間風による顕熱負荷、 $W$   $\tau$ : 時間、 $s$

表 1 反射されたエネルギー粒子の射出方向

反射面	$\eta$	$\theta$	範囲
床 4	$\sin^{-1} \sqrt{R_\eta}$	$2\pi R_\theta$	$0 < \eta < \pi/2$ $0 < \theta < 2\pi$
天井 5	$\pi - \cos^{-1} \sqrt{R_\eta}$	$2\pi R_\theta$	$\pi/2 < \eta < \pi$ $0 < \theta < 2\pi$
内壁 3	$2\eta - \sin(2\eta) - 2\pi R_\eta = 0$	$\pi R_\theta$	$0 < \eta < \pi$ $0 < \theta < \pi$
外壁 6		$\pi R_\theta + \pi/2$	$0 < \eta < \pi$ $\pi/2 < \theta < 3\pi/2$
窓 7		$\pi R_\theta + \pi$	$0 < \eta < \pi$ $\pi < \theta < 2\pi$
内壁 1		$\pi R_\theta + 3\pi/2$	$0 < \eta < \pi$ $3\pi/2 < \theta < 5\pi/2$
内壁 2			
内壁 8			

$HCL$ : 空調機の顕熱除去熱量 (空調負荷)、 $W$   
(冷房時:  $HCL > 0$  暖房時:  $HCL < 0$ )

⑥室内空気の水分収支

室内空気の絶対湿度は一様分布とし、室内空気について以下の収支式を用いる。

$$V\rho(dx_i/d\tau) = W_R + W_L - WCL \quad (11)$$

ただし、

$W_R$ : 室内の水分発生量、 $kg/s$

$W_L$ : 隙間風による水分取得、 $kg/s$

$WCL$ : 空調機の除湿量 (空調負荷)、 $kg/s$

(除湿時:  $WCL > 0$  加湿時:  $WCL < 0$ )

⑦平均放射温度の計算

空気温度、気流速度が一様分布の場合でも居住者の位置によって平均放射温度が異なり快適性が変わる。温冷感を考慮した負荷計算では、このような影響を考慮して平均放射温度を計算する。本研究では居住者を微小体と看做しその平均放射温度を次式で計算する。

$$MRT^4 = \sum_{j=1}^J B_{oj} T_j^4 \quad (12)$$

ただし、

$MRT$ : 平均放射温度、 $K$

$T_j$ : 内表面  $j$  の温度、 $K$

$B_{oj}$ : 微小体 (居住者) に対する内表面  $j$  の Gebhart の吸収係数

$B_{oj}$  は、式(6)の  $m$  を  $o$  で置き換えれば求められるが、式(6)から  $B_{oj}$  を計算する場合、任意な位置にある微小体に対する各内表面の形態係数を計算する必要がある。本研究では、任意な位置にある微小体の  $B_{oj}$  を簡単に計算するため、Monte Carlo 法を用いた。空中にある微小体の位置 (検討点) が決まれば、そこから射出するエネルギー粒子の射出方向 ( $\eta$ ,  $\theta$ ) は式(13)と式(14)で求められる。

$$2R_\eta + \cos \eta = 1 \quad (0 < \eta < \pi) \quad (13)$$

$$\theta = 2\pi R_\theta \quad (\pi/2 < \theta < 3\pi/2) \quad (14)$$

本研究では、エネルギー粒子の吸収・反射を追跡し、最終的に各表面に吸収された粒子数と検討点から射出された総粒子数との比を各表面の Gebhart の吸収係数とする。

⑧自然室温の計算

式(1)を室内の8つの表面に、式(10)を室内空気に、それぞれ適用すれば、以下の式(15)が得られる。

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,8} & a_{1,9} \\ \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & & \cdot & \cdot \\ a_{8,1} & \dots & a_{8,8} & a_{8,9} \\ a_{9,1} & \dots & a_{9,8} & a_{9,9} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} t_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ t_8 \\ t_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_8 \\ b_9 \end{pmatrix} \quad (15)$$

行列 $[a]$ と $[b]$ は対流熱伝達率や放射熱伝達率および外界気象条件などの既知項で構成されているため、 $n$ 時刻における内表面温度 $t_j$  ( $j=1, \dots, 8$ )と自然室温 $t_i$ が上式で求められる。

⑨現行の負荷計算

式(15)の室内空気温度 $t_i$ を設定値 $t_{i, set}$ にして、式(16)より $n$ 時刻における内表面温度 $t_j$  ( $j=1, \dots, 8$ )が求められる。

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,8} \\ \cdot & & \cdot \\ a_{8,1} & \dots & a_{8,8} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} t_j \\ \cdot \\ t_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 - a_{1,9} \times t_{i, set} \\ \cdot \\ b_8 - a_{8,9} \times t_{i, set} \end{pmatrix} \quad (16)$$

室内顕熱発熱量と隙間風による顕熱負荷がない場合、式(10)より現行の空調負荷(顕熱)が次式で求められる。

$$HCL = \sum_{j=1}^8 S_j \alpha_{c,j} (t_j - t_{i, set}) \quad (17)$$

⑩温冷感を考慮した負荷計算

温冷感を考慮した負荷計算では、居住者の快適性が維持されるときに室内空気や壁体内表面から除去すべき熱量を空調負荷として定義している。自然室温の計算式(15)を利用して、各内表面の熱収支式に除去熱量項 $EHCL_j$ を、室内空気の熱収支式に除去熱量項 $EHCL_i$ を付け加えると、以下の式が得られる。

$$\begin{pmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,8} & a_{1,9} \\ \cdot & & \cdot & \cdot \\ \cdot & & \cdot & \cdot \\ a_{8,1} & \dots & a_{8,8} & a_{8,9} \\ a_{9,1} & \dots & a_{9,8} & a_{9,9} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} t_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ t_8 \\ t_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 + S_1 \times EHCL_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_8 + S_8 \times EHCL_8 \\ b_9 + EHCL_i \end{pmatrix} \quad (18)$$

ここに、  
 $EHCL_j$  ( $j=1, \dots, 8$ ): 各内表面からの除去熱量、  
 $W/m^2$

$EHCL_i$ : 室内空気からの除去熱量、 $W$

居住者所在位置(検討点)のPMVが設定値となるように、式(18)左辺の $EHCL_j$ や $EHCL_i$ を変化させ、壁内表面温度 $t_j$ と室温 $t_i$ を求める。PMVが設定値となったときに空調負荷を次式で求める。

$$NHCL = EHCL_i + \sum_{j=1}^8 (S_j \times EHCL_j) \quad (19)$$

ここに、

$NHCL$ : 温冷感を考慮した空調負荷、 $W$

(冷房時: $NHCL > 0$  暖房時: $NHCL < 0$ )

今回は、顕熱負荷を中心に検討し、潜熱負荷を考慮していない。

(2)シミュレーションによる検討結果

計算対象建物の寸法と壁面番号は図1に示す。各壁体の構成は表2に示す。

建物は東京にあり、窓は南に向いているものとする。計算は、東京の標準気象データを使い、1月1日1時から12月31日24時まで行った。1月1日1時から1月21日1時までの20日間は助走計算期間とし、計算結果に含まない。計算時間間隔は10分とし、隙間風、内部発熱、内部水蒸気発生はないものとする。室内対流熱伝達率は一律 $4.4 W/(m^2 \cdot K)$ とする。

検討点は、室の奥、室中央および窓付近に配置される(詳細は表3を参照されたい)。

①現行の負荷計算法による計算結果

室温設定値 $t_{i, set}$ を年間一定の $25^\circ C$ として、式(16)と式(17)から、現行の負荷計算法によって計算を行った。

表4は、冬期(1、2、11、12月)、中間期(3、4、5、10月)、夏期(6、7、8、9月)および年間(1~12月)の処理熱量とPMVを示したものである。処理熱量は、各時刻の負荷に計算時間間隔(600秒)をかけて、その期間にわたって合計したものである。PMVは、その期間の平均値である。

表4より、現行の負荷計算では、冷暖房の処理熱量が検討点の位置によらずに一定であるが、検討点のPMVはその位置によって変わることがわかる。夏期冷房時では、検討点が「室中央(下)」に位置する場合、PMVが0.183となることに対し、「室の奥(中)」に位置する場合は、PMVが0.094となる。また、「室中央(上)」に位置する場合は、PMVが0.166となる。年間を通して見ると、「室の奥(中)」に位置する場合は、PMVが0.114、「室中央(下)」に位置する場合はPMVが0.206、その差は0.137となる。計算対象建物の規模が大きくなれば位置によるPMVの差がさらに大きくなることが推測される。

上記の計算結果から、現行の負荷計算法では、居住者の温冷感が十分に考慮されていなく、居住者の位置による温冷感の違いが反映できず、負荷と温冷感との関連性が明確ではないことがわかる。

②空気から熱を除去(新負荷計算法)

空気から熱を除去することによって検討点での温冷感を維持する場合、式(18)と式(19)より、検討点のPMVが0となるように、空気からの除去熱量 $EHCL_i$ を計算し空調負荷 $NHCL$ が求められる。

各検討点の期間空調負荷は表5に示す。今回の計算では、設定室温を $25^\circ C$ とした現行の負荷計算(表4)に比べて、空気から熱を除





約 8%と約 4%になるが、年間では約 6%に達する。

今回の計算において、天井から熱を除去する場合の最大負荷（検討点「窓付近（中）」、表 7）は、空気から熱を除去する場合（同、表 5）の最大負荷より約 25%増加した。

以上のように、温冷感を考慮した負荷計算法では、天井面から熱を除去する場合の負荷も計算できる。

### (3)実験による研究結果

図 2 に示す放射環境実験室を利用して放射パネルの距離の違いによる快適性および暖房投入熱量の変化を調べた。

図 3 から、ほぼ同様な快適性が維持されたとき、パネル表面温度やパネルとの距離の違いにより暖房時の投入熱量が異なることがわかった。

図 3 より、パネルとの距離が 1.5m の場合、パネル表面温度 33℃のほうは 30℃より暖房投入熱量が約半分削減できることがわかる。

パネル表面温度が 33℃の場合、距離が 1.5m のときの暖房投入熱量が 0.5m のときより少ない結果となった。これは、今回の実験では、放射パネルが床との間に約 27cm の隙間があり、PMV 計が床上 0.5m の高さに設置されているので、PMV 計がパネルに近い場合は放射パネル後部にある壁の影響を受けやすいからである。

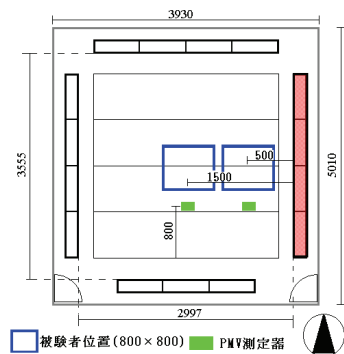


図 2 放射環境実験室概要

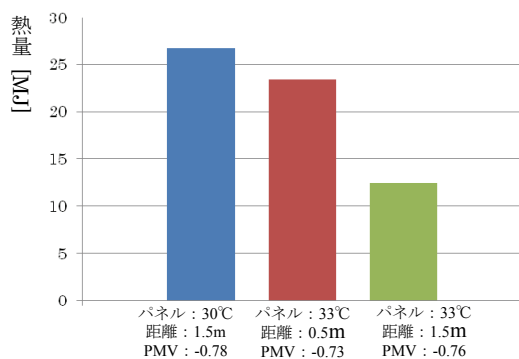


図 3 暖房時の投入熱量

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① 崔軍、渡辺俊行：居住者の温冷感を考慮した空調負荷計算法に関する研究、日本建築学会環境系論文集、Vol.74、No.638、449-456、(2009)、査読あり

〔学会発表〕（計 5 件）

- ① 崔軍、渡辺俊行：居住者の温冷感を考慮した空調負荷計算法に関する研究 その 3 内断熱と外断熱の違いについて、平成 20 年度日本建築学会中国支部研究発表会（松江）、2009.3.7
- ② 芳田遼平、崔軍、井田達也、菅田直幸：輻射冷暖房システムの快適性と省エネルギー性に関する研究 その 2 壁面輻射パネルを用いた輻射暖房の快適性とエネルギー消費量、平成 20 年度日本建築学会中国支部研究発表会（松江）、2009.3.7
- ③ 崔軍、渡辺俊行：居住者の温冷感を考慮した空調負荷計算法に関する研究 その 2 従来の負荷計算との比較、日本建築学会 2008 年大会（広島）、2008.9.20
- ④ 崔軍、渡辺俊行：居住者の温冷感を考慮した空調負荷計算法に関する研究 その 1 単室モデルの概要、平成 19 年度日本建築学会中国支部研究発表会（呉）、2008.3.9
- ⑤ 芳田遼平、崔軍、池上智久：輻射冷暖房システムの快適性と省エネルギー性に関する研究 その 1 輻射パネルの表面温度と設置位置の影響、平成 19 年度日本建築学会中国支部研究発表会（呉）、2008.3.9

〔その他〕

ホームページ

<http://www.archi.hiro.kindai.ac.jp/laboratory/EFL/teacher.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

崔 軍 (CUI JUN)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号：90320340

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし